

УДК 535.233.4

## Калибровка моделей абсолютно черных тел для тепловидения и пирометрии

© 2017 г. **Е. И. Алешко; А. И. Гараева; В. И. Курт, доктор техн. наук**

Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Поступила в редакцию 18.10.2016

Рассмотрены вопросы поверки и калибровки моделей абсолютно черных тел, применяемых при определении характеристик оптико-электронных приборов, работающих в различных областях спектра. Показано, что при одной и той же термодинамической температуре модели абсолютно черного тела ее яркостные температуры в различных спектральных диапазонах не равны. Приведено сравнение усредненных поправок к показаниям термометра аттестуемого излучателя и рассчитанных поправок на конкретной длине волны излучения.

**Ключевые слова:** тепловизионный прибор, модель абсолютно черного тела, поверка, спектральный диапазон работы модели абсолютно черного тела, поправки к показаниям термометра поверяемой модели абсолютно черного тела.

**Коды OCIS:** 120.5240, 120.3940

Для измерения энергетических характеристик тепловизионных приборов, а также градуировочных характеристик пирометров различного назначения применяют модели абсолютно черных тел (МАЧТ). Поверка МАЧТ проводится путем сличения ее характеристик с характеристиками МАЧТ более высокого уровня точности (рабочие эталоны) с помощью радиометра-компаратора или методом прямых измерений с помощью образцовых пирометров 1-го разряда [1].

Тепловизионные приборы, как правило, работают в диапазонах спектра 3–5 и 8–12 мкм. Рабочие спектральные диапазоны оптических пирометров более разнообразны. Например, спектральные диапазоны пирометров фирмы ДИЭЛТЕСТ имеют следующие параметры: 0,6–0,9, 0,9–1,1, 1,1–1,6, 0,9–4,5, 1,1–4, 1,2–4 и 8–14 мкм.

ГОСТ [2] предписывает проводить сличения МАЧТ по полному излучению, в отдельных спектральных диапазонах (частичное излучение) — на спектрокомпараторах. При этом, если не указана область применения МАЧТ, то в диапазоне температур –50–300 °С сличение МАЧТ необходимо проводить радиометром-компаратором полного излучения, а в диапазоне 300–1000 °С — радиометром-компаратором частичного излучения, в диапазоне свыше 1000 °С — на спектрокомпараторах в интервалах длин волн, определяемых назначением поверяемого МАЧТ.

Проведем оценку поправок к показаниям термометра аттестуемого излучателя в условиях различных температур и спектральных диапазонов сличения МАЧТ.

Сличения проводят методом уравнивания сигналов от эталонного и поверяемого излучателей, регулируя температуру эталонного излучателя, которая при равенстве сигналов приписывается поверяемому излучателю. Разность температур эталонного излучателя и поверяемого (по его термометру) есть поправка  $\Delta t_m$ .

Оценка проводилась в спектральных интервалах с эффективными длинами волн  $\lambda_{\text{eff}} = 1, 4, 10$  мкм и для полного излучения ( $0 < \lambda < \infty$ ).

Расчет яркостных температур в спектральных интервалах проводился по формулам

$$T_L = \frac{C_2}{\lambda \ln \left[ C_1 / \left( \pi \lambda_{\text{eff}}^5 L_n \right) + 1 \right]}.$$

Здесь  $C_1$ ,  $C_2$  — постоянные излучения,  $\lambda_{\text{eff}}$  — эффективная длина волны спектрального интервала,  $L_n$  — спектральная плотность энергетической яркости поверяемого излучателя на  $\lambda_{\text{eff}}$ , где  $L_n = L_{0\lambda} \varepsilon_{0,n} + (1 - \varepsilon_{0,n}) L_{\lambda \text{ hum}}$  — в температурном диапазоне 220–353 К, при температурах не менее 350 К второе слагаемое не учитывалось,  $L_{0\lambda}$  — эффективная яркость идеального излучателя при температурах уравнивания,  $\varepsilon_{0,n}$  — излучательная способность эталонного (0) либо поверяемого (n) излучателей,  $L_{\lambda \text{ hum}}$  — эффективная яркость фона.

Результаты расчетов приведены в таблице. Расчеты проводились для случая, когда излучательная способность эталонного излучателя  $\varepsilon_0 = 0,999$  и поверяемого  $\varepsilon_n = 0,99$ ,  $T_{\text{hum}} = 295$  К.

## Расчетные яркостные температуры

| $\lambda_{\text{эфф}}$ , мкм | $T_0$ , К | $T_{0L}$ , К | $T_{nL}$ , К | $\Delta t_m$ , °С |
|------------------------------|-----------|--------------|--------------|-------------------|
| 10                           | 233       | 233,091      | 233,909      | +0,82             |
| 0–∞                          | 233       | 233,101      | 234,013      | +0,91             |
| 4                            | 310       | 309,988      | 309,881      | –0,107            |
| 10                           | 310       | 309,986      | 309,860      | –0,126            |
| 0–∞                          | 310       | 309,986      | 309,860      | –0,126            |
| 4                            | 350       | 349,973      | 349,729      | –0,24             |
| 10                           | 350       | 349,960      | 349,59       | –0,37             |
| 0–∞                          | 350       | 349,957      | 349,566      | –0,4              |
| 1                            | 1000      | 999,93       | 999,3        | –0,63             |
| 4                            | 1000      | 999,73       | 997,29       | –2,4              |
| 10                           | 1000      | 999,47       | 994,69       | –4,8              |
| 0–∞                          | 1000      | 999,75       | 997,49       | –2,26             |
| 1                            | 1273      | 1272,89      | 1271,87      | –1,02             |
| 4                            | 1273      | 1272,58      | 1268,75      | –3,83             |
| 10                           | 1273      | 1272,24      | 1265,37      | –6,87             |
| 0–∞                          | 1273      | 1272,68      | 1269,80      | –2,88             |

Знаки «+» и «–» в колонке  $\Delta t_m$  означают, что температуру эталонного излучателя надо поднять или опустить на  $\Delta t_m$ , чтобы получить равенство сигналов компаратора.

Как видно из таблицы, поправки к показаниям термометра в различных спектральных интервалах разные даже при излучательной способности поверяемого излучателя 0,99, что вытекает из зависимости  $L = f(T)$  в этих интервалах, т.е. даже у «серого» излучателя с высокой излучательной способностью яркостные температуры в различных областях спектра не равны.

В ГОСТе [2] предлагается поправки, полученные в различных спектральных диапазонах, усреднять и максимальное отклонение поправки от среднего учитывать как составляющую погрешности. И только «допускается приводить в сертификате значения поправок для каждого диапазона» при калибровке. По мнению авторов настоящей статьи, такой подход в определенных случаях является некорректным. Один и тот же источник излучения на основе МАЧТ может использоваться при определении характеристик оптико-электронных приборов (ОЭП), работающих в различных спектральных диапазонах. При более высоких температурах (от 1000 °С) усреднение отклонений может привести к возникновению существенной неучтенной погрешности.

Так, при температуре 1273 °С при использовании источника излучения для определения характеристик двух ОЭП, имеющих максимумы чувствительности на длинах волн 1 и 10 мкм соответственно, значение усредненной поправки составляет –3,95 °С. В то же время рассчитанная поправка составляет –1,03 °С на длине волны 1 мкм. С учетом того, что для рабочих эталонов первого разряда, согласно поверочной схеме [1], доверитель-

ные границы абсолютной погрешности составляют 5 °С в точке 3000 °С, а при температуре 1273 °С это значение будет существенно меньше, усредненная поправка переводит такой источник излучения в более низкий разряд.

Считаем, что поправки в каждом спектральном интервале должны определяться отдельно. Усреднение поправок возможно, если они близки и находятся в пределах воспроизводимости результатов измерений по общей выборке или выборке по спектральным интервалам. Это может быть в том случае, если излучающая полость поверяемого излучателя имеет коэффициент излучения, близкий к коэффициенту излучения излучающей полости эталонного излучателя.

Анализ результатов расчетов, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод, что в диапазоне температур 273–330 °С усреднение поправок в различных спектральных интервалах можно провести без потери точности поверки излучателя в каждом спектральном интервале.

В этом диапазоне температур важна фоновая составляющая яркости. При изменении температуры фона (температуры камеры, в которой калибруются излучатели) поправки изменяются тем больше, чем меньше излучательная способность поверяемого излучателя. При поверке температуру фона необходимо фиксировать и записывать ее в свидетельство о поверке.

В ГОСТе [2] не указывается, что в качестве эталонных используются излучатели только полостного типа. В то же время в ГОСТе [3] для поверки некоторых характеристик тепловизоров-радиометров используется «эталонный (образцовый) протяженный излучатель», излучательная способность которого может быть 0,96. А указанная погрешность (1,1 °С) выводит его в поле рабочих эталонов 2-го разряда по поверочной схеме [1].

Считаем, что в ГОСТе [2] необходимо конкретизировать на уровне допускаемых пределов требования к техническим характеристикам эталонных излучателей и дополнительно ввести характеристику «коэффициент излучательной способности», являющийся количественной оценкой эффективности излучения излучающей полости МАЧТ.

Проверку качества МАЧТ по этой характеристике можно проводить в рамках ГОСТа [2], а именно в том пункте, где определяются поправки  $\Delta t_m$ , полученные в разных спектральных интервалах. Критерием качества МАЧТ по характеристике «излучательная способность» может служить именно отличие поправок в 2–3 спектральных диапазонах. И если эти отличия превосходят какое-то заранее заданное значение поправок для эталонных МАЧТ, то они должны изыматься из обращения или переводиться в более низкий разряд.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.558-2009 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения температуры. П. 4.3 «Рабочие эталоны».
2. ГОСТ Р 8.566-2012 ГСИ. Излучатели в виде моделей абсолютного черного тела. Методика поверки и калибровки.
3. ГОСТ Р 8.619-2006 ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки.